

# ANÁLISIS EXPLORATORIO DE FIRMAS ESPECTRALES E ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA LA MONITORIZACIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EN UN ANÁLOGO NATURAL

J. Gutiérrez del Olmo Miguel<sup>(1)</sup>, R. García Rodríguez<sup>(1)</sup>, L. Iglesias Martínez<sup>(2)</sup>, R. de la Vega Panizo<sup>(2)</sup>,  
M. Rincones Salinas<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Av. Complutense s/n. 28040. Madrid.  
jorgegutierrezdelolmo@gmail.com

<sup>(2)</sup>ESTI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid.

## RESUMEN

Se ha analizado el problema de la detección de fugas de CO<sub>2</sub> en reservorios naturales utilizados como almacenes de este gas. Los trabajos han sido realizados sobre un área del Campo de Calatrava, Ciudad Real, España, donde a causa de la actividad volcánica remanente se pueden encontrar puntos de emisión de CO<sub>2</sub>. Se han utilizado imágenes QuickBird y WorldView-2 para la generación de firmas espectrales e índices de vegetación. Estos índices han sido evaluados para obtener los más idóneos para la detección de fugas de CO<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** teledetección, CO<sub>2</sub>, vegetación, satélite.

## ABSTRACT

*The problem of detecting CO<sub>2</sub> leaks in natural reservoirs used to store the gas has been analyzed. The works have been done over an area where, because of the residual volcanic activity, CO<sub>2</sub> delivery spots can be found. This area is located in Campo de Calatrava, Ciudad Real, Spain. QuickBird and WorldView-2 imagery has been used to generate spectral signatures and vegetation indexes. These indexes have been evaluated in order to obtain the most suitable ones to detect CO<sub>2</sub> leaks.*

**Keywords:** remote sensing, CO<sub>2</sub>, vegetation, satellite.

## 1. OBJETO Y ÁREA DE INVESTIGACIÓN

El control de las emisiones de gases de efecto de invernadero a la atmósfera tiene diversos enfoques a seguir. Uno de ellos es la captura y almacenamiento geológico del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), donde algunos de los factores más importantes a determinar son los posibles riesgos sobre las personas, el medio ambiente e infraestructuras. Es por ello, que resultan cruciales las investigaciones sobre técnicas de monitorización del emplazamiento de almacenamiento (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, 2005).

En el contexto de la utilización de reservorios naturales para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> se ha investigado el problema de la localización y seguimiento de las fugas de éste gas (IEAGHG, 2012). La utilización de técnicas de teledetección ha sido complementada con el apoyo de mediciones de campo (Bateson *et al.*, 2008, y Zarco-Tejada *et al.*, 1998).

La investigación se ha llevado a cabo en una zona en la que, debido a la actividad volcánica residual, se pueden encontrar diversos puntos de emisión de CO<sub>2</sub>. Éste área está localizada en Campo de Calatrava, Ciudad Real, España (38°49'N, 3°46'W).



**Figura 1.** Ubicación de la zona de trabajo.

La adición de CO<sub>2</sub> a las plantas y a los cultivos (fertilización carbónica) puede producir efectos contradictorios. Mientras que la adición en cantidades moderadas puede estimular el crecimiento de las plantas y el incremento en la actividad vegetal, dosis elevadas pueden llevar a la muerte de la vegetación y en general incluso a la mayoría de los pequeños animales circundantes al punto de emisión.

Los trabajos de investigación que hemos llevado a cabo hasta el momento han consistido en el preprocesamiento de imágenes de satélite, el análisis y la validación de firmas espectrales y la generación de índices de vegetación. Posteriormente los índices

han sido comparados, seleccionándose aquellos que han demostrado mayor sensibilidad para la continuación de las tareas de investigación. Éstas incluirán la incorporación de mayor cantidad de datos, tanto los procedentes de vuelos y/u otros satélites como capturados en campo, en un sistema de información geográfico con el objeto de modelizar y evaluar la naturaleza de los efectos de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Dentro de la zona de interés mostrada en la Figura 1 se han seleccionado tres áreas de menor tamaño donde están especialmente concentrados los puntos de emisión de CO<sub>2</sub>.

## 2. DATOS ESPACIALES Y ADICIONALES

Se ha trabajado con dos imágenes de muy alta resolución espacial correspondientes a los satélites World View-2 y QuickBird, cuyas características más importantes se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características de las imágenes

| Satélite       | WorldView-2   | QuickBird                     |
|----------------|---|-------------------------------|
| Adquisición    | 21/08/2010<br>11:18:18<br>11:18:54                                      | 11/10/2009<br>11:10:48        |
| Tamaño (pixel) | 7645x5557<br>2460x5557  | 7871x4630                     |
| GSD medio (m.) | 1,978/1,901   | 2,456                         |
| Bandas         | 1-Coastal, 2-Blue, 3-Green, 4-Yellow, 5-Red, 6-Red Edge, 7-NIR1, 8-NIR2 | 1-Blue, 2-Green, 3-Red, 4-NIR |
| Bits por pixel | 16  | 16                            |

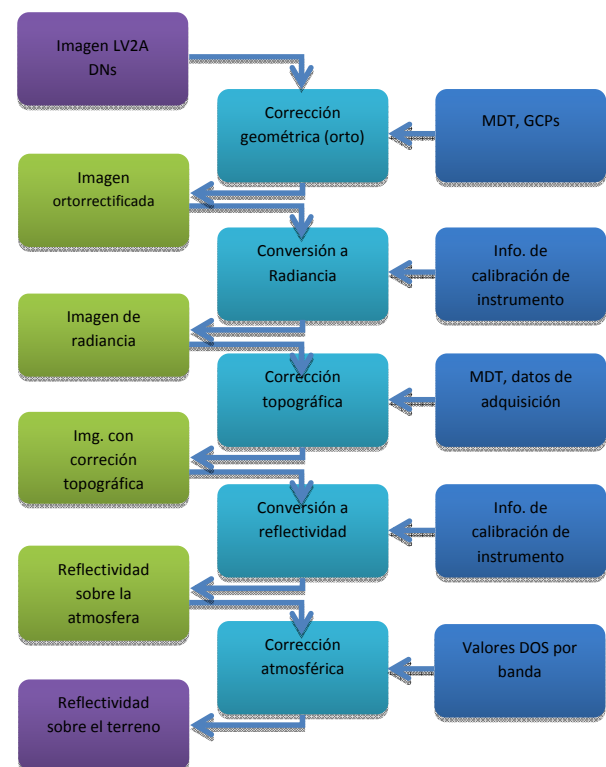
Para apoyar estos datos se ha recogido información adicional útil para su integración en un SIG y la posterior realización de análisis multidimensionales. Estos datos son:

- Mapas geológicos
- Información de usos del suelo, tomada en campo y proveniente de mapas
- Imágenes ópticas y en falso color infrarrojo del Plan Nacional de Observación de la Tierra (PNOA)
- Modelo digital del terreno de la misma fuente (espaciado de 5 metros)
- Medidas de concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> tomadas en los puntos de emisión
- Medidas de radiancia de diferentes tipos de suelos y vegetación tomadas con un espectrorradiómetro
- Fotografías tomadas sobre el terreno

## 3. PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Antes de poder realizar análisis radiométricos o espectrales o comparaciones con otros datos provenientes de la misma o de otras plataformas o sensores es necesario, como mínimo, convertir los niveles digitales de las imágenes de satélite suministradas por European Space Imaging (EUSI) a radiancia espectral. Esto se ha realizado siguiendo las indicaciones técnicas de Digital Globe, para las imágenes QuickBird (Krause, 2005) y WorldView-2 (Updike *et al.*, 2010).

En la Figura 2 se muestra un esquema de los pasos seguidos en el preprocesamiento de las imágenes, que incluye los procedimientos usuales aplicados en este tipo de estudios y que se describen a continuación.



**Figura 2.** Esquema de preprocesamiento.

Debido a las distorsiones topográficas, atmosféricas y de otros tipos, es recomendable transformar incluso los valores de radiancia sobre la atmósfera a valores de reflectividad sobre el terreno con objeto de obtener resultados más precisos y consistentes. Los valores de reflectividad sobre el terreno dependen exclusivamente de las condiciones del mismo.

El proceso de corrección geométrica se ha hecho utilizando el modelo digital del terreno del PNOA, con 5 m. de espaciado. Las imágenes de referencia utilizadas para la extracción de puntos de control proceden también de la misma fuente. El tamaño de

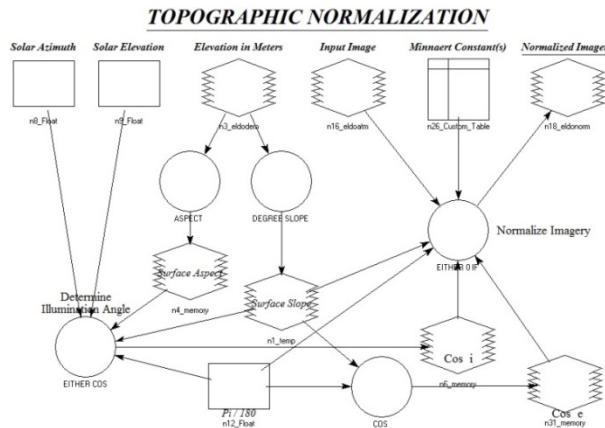
pixel es de 0,50 m. y el error de georreferenciación RMS es de 1 m. (Arozarena *et al.*, 2005).

La conversión a radiancia se ha hecho siguiendo las instrucciones técnicas (Krause, 2005, y Updike *et al.*, 2010) publicadas por Digital Globe, mediante la expresión (1):

$$L_{\lambda \text{Pixel, Band}} = \frac{K_{\text{Band}} \cdot q_{\text{Pixel, Band}}}{\Delta \lambda_{\text{Band}}} \quad (1)$$

donde  $L_{\lambda \text{Pixel, Band}}$  es la radiancia espectral de la toma sobre la atmósfera [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ],  $K_{\text{Band}}$  es el factor absoluto de calibración radiométrica [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{count}^{-1}$ ] para cada banda,  $q_{\text{Pixel, Band}}$  es la imagen corregida radiométricamente, y  $\Delta \lambda_{\text{Band}}$  es el ancho de banda efectivo para una banda determinada ( $\mu\text{m}$ ).

La corrección topográfica compensa las diferencias creadas en la imagen debido a las diferentes orientaciones del terreno y su desigual exposición a la fuente de iluminación (Riaño *et al.*, 2000). Esta se ha realizado siguiendo el modelo implementado en el software ERDAS Imagine (ver Figura 3), en el que intervienen el modelo digital del terreno y la información de posicionamiento del satélite y del sol en el momento de la adquisición.



**Figura 3.** Modelo de corrección topográfica.

La conversión a reflectividad sobre la atmósfera se ha hecho igualmente siguiendo las instrucciones de Digital Globe, aplicando la fórmula (2) para obtener la reflectividad promediada por banda sobre la atmósfera,

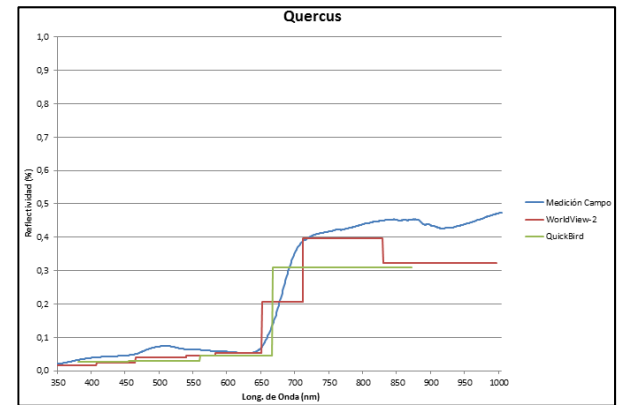
$$\rho_{\lambda \text{Pixel, Band}} = \frac{L_{\lambda \text{Pixel, Band}} \cdot d_{\text{ES}}^2 \cdot \pi}{E_{\text{sun}} \cdot \cos(\theta_s)} \quad (2)$$

donde  $L_{\lambda \text{ pixel, band}}$  es la radiación directa reflejada por la superficie,  $\rho_{\lambda \text{ pixel, band}}$  es la reflectividad espectral difusa del objeto,  $E_{\text{sun}}$  es la irradiancia espectral solar,  $\theta_s$  es el ángulo cenital del sol, y  $d_{\text{ES}}$  es la distancia tierra-sol.

Por último, para convertir la reflectividad sobre la atmósfera a reflectividad sobre el terreno es necesario eliminar los efectos y distorsiones atmosféricos, para lo que se ha aplicado *Dark Object Subtraction Method* (Chavez *et al.*, 1988).

#### 4. ANÁLISIS DE SIGNATURAS ESPECTRALES

Mediante espectrorradiometría de campo se obtuvieron mediciones de reflectividad de diferentes tipos de usos del suelo (Ulex, viñedo, suelo desnudo, Quercus, almendro, carrizo, agua, olivo, cebada y Sima), con los que se ha realizado análisis de firmas espectrales con un doble objetivo; por un lado validar los resultados del preprocesamiento y por otro detectar anomalías puntuales en los puntos de emisión de CO<sub>2</sub>.

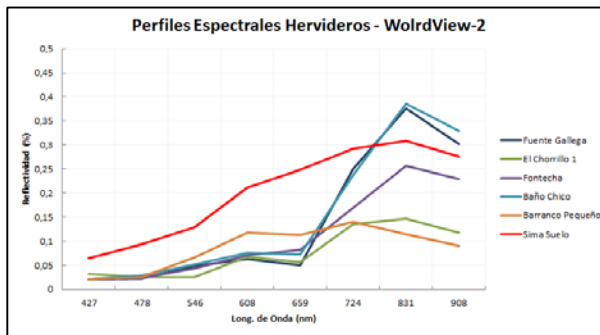


**Figura 4.** Signaturas espectrales del Quercus.

La validación del preprocesamiento se ha realizado mediante la comparación de las firmas espectrales de los diez tipos de ocupaciones obtenidas a partir de las mediciones con el espectrorradiómetro de campo con las procedentes de los datos de satélite sobre los mismos puntos. El grado de similitud ha sido bastante alto, como se puede apreciar en la Figura 4, siendo las mayores diferencias en ocho de los diez objetivos (olivo, almendro, carrizo, suelo desnudo, agua, sima, Quercus y Ulex) siempre inferiores a un 10% de la reflectividad. Los dos únicos objetivos con diferencias máximas en las firmas superiores al 10% han sido la cebada (diferencias de reflectividad de hasta el 15%) y el viñedo (hasta un 20%, únicamente entre los 700 nm y los 950 nm). Estas variaciones encontradas en estos dos tipos de cultivo son probablemente debidas a no haber sido realizadas las tres tomas de forma simultánea y a las posibles variaciones en las condiciones de humedad o estado fenológico.

El análisis de las firmas espectrales de los puntos de emisión de CO<sub>2</sub> nos ha indicado una clara diferencia entre la signatura del único hervidero seco presente en la zona, la Sima, y el resto de hervideros, de carácter húmedo. Esta diferencia en las firmas es especialmente apreciable en las longitudes de onda que van desde el amarillo (608 nm) al rojo (659 nm), en las

que la diferencia de reflectividad oscila entre un 15% y un 20% (Figura 5).



**Figura 5.** Comparación de firmas espectrales de los hervideros seco (en rojo) y húmedos.

## 5. ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Se han obtenido doce índices de vegetación a partir de la imagen WorldView-2 y ocho índices a partir de la imagen QuickBird, descritos en la Tabla 2.

Los índices de vegetación se han generado en tres áreas donde se puede encontrar una mayor concentración de puntos de emisión de CO<sub>2</sub>. En la Figura 5 se localizan todos los puntos de emisión de CO<sub>2</sub> y las tres zonas seleccionadas dentro de las imágenes.

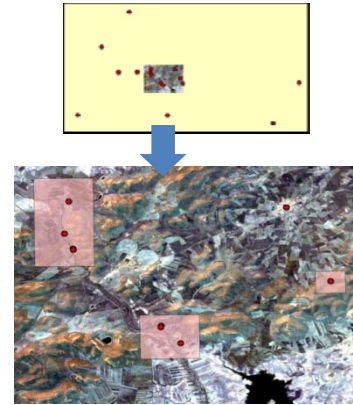
**Tabla 2.** Índices de Vegetación obtenidos

| I.V.     | QuickBird   | WorldView-2  |
|----------|---|--|
| PRI1     | -   | $(B3-B2) / (B3+B2)$  |
| PRI2     | -   | $(B4-B3) / (B4+B3)$  |
| NDVI     | $(B4-B3) / (B4+B3)$   | $(B7-B5) / (B7+B5)$  |
| PWI      | -   | $B8 / B7$  |
| SR       | $B4 / B3$   | $B7 / B5$  |
| MSR      | $(SR-1) / \text{Sqrt}(SR+1)$                                | $(SR-1) / \text{Sqrt}(SR+1)$                                 |
| NPI      | -   | $(B2-B1) / (B2+B1)$  |
| SRPI     | $B1 / B3$   | $B1 / B5$  |
| G        | $B2 / B3$   | $B3 / B5$  |
| Red Edge | $(NDVI/0,6359) \cdot \text{Exp.}(1/0,1057)$                 | $(NDVI/0,6359) \cdot \text{Exp.}(1/0,1057)$                  |
| SAVI     | $((B4-B3)/(B4+B3+L)) \cdot (1+L)$                           | $((B7-B5)/(B7+B5+L)) \cdot (1+L)$                            |
| EVI      | $2,5 \cdot ((B4-B3) / (L+B4+(C1 \cdot B3) - C2 \cdot B1)))$ | $2,5 \cdot ((B7-B5) / (L+B7+(C1 \cdot B5) - (C2 \cdot B2)))$ |

## 6. RESULTADOS

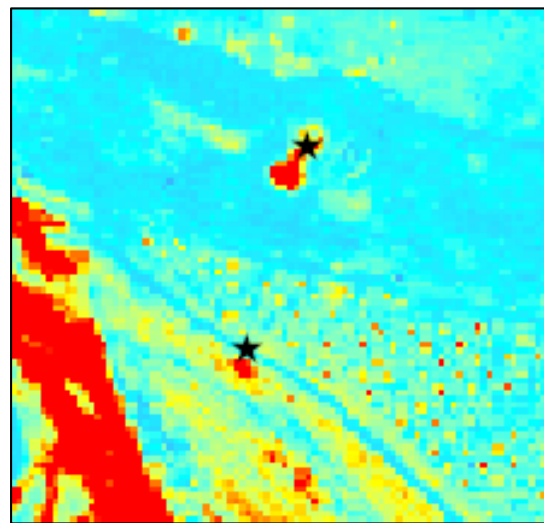
Se han encontrado evidencias de detección de puntos de emisión de CO<sub>2</sub> en algunas de las imágenes de índices de vegetación calculados. Estas evidencias son de dos tipos bien diferenciados: en puntos de emisión húmedos y en puntos de emisión secos.

En los puntos de emisión de CO<sub>2</sub> húmedos estudiados es frecuente que la vegetación se vea alterada. Por ello aparecen especies nuevas, no presentes en las zonas circundantes, y en general la actividad vegetal se ve incrementada. Algunos de los índices de vegetación analizados presentan altos valores en estos puntos.



**Figura 6.** Ubicación de puntos de emisión de CO<sub>2</sub>.

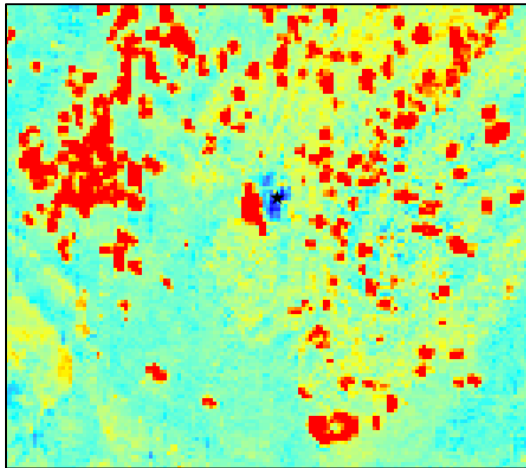
En el único punto de emisión seca de CO<sub>2</sub> presente en la zona, la vegetación no es capaz de crecer en su entorno, pudiéndose encontrar incluso pequeños animales muertos. Algunos de los índices de vegetación analizados muestran claras evidencias de la detección de éste fenómeno arrojando valores muy bajos en este punto, en contraste con la zona circundante, que mantiene valores normales.



**Figura 7.** Índice SR de la zona del río Javalón obtenido a partir de la imagen QuickBird

En la Figura 7 se puede observar la anomalía detectada en dos puntos de emisión húmeda en una imagen del índice de vegetación Simple Ratio (SR) obtenida a partir de la imagen QuickBird.





**Figura 8.** Índice NDVI de la zona de la Sima obtenido a partir de la imagen WorldView2

En la Figura 8 se puede observar la anomalía detectada en el punto de emisión seca denominado la Sima en una imagen del índice de vegetación NDVI obtenida a partir de la imagen WorldView-2.

**Tabla 3.** Escala gráfica para la detección de anomalías.

| Puntuación | Criterio                      | Escala gráfica |
|------------|-------------------------------|----------------|
| 1          | Ninguna detección             |                |
| 2          | Alguna anomalía detectada     |                |
| 3          | Ligera evidencia de detección |                |
| 4          | Evidencia de detección        |                |
| 5          | Fuerte evidencia de detección |                |

Se ha realizado un análisis visual de todas las imágenes de índice de vegetación resultantes, en cada uno de los puntos de emisión de las tres zonas seleccionadas, con el objeto de seleccionar los más interesantes atendiendo a su aparente capacidad de detección. En la Tabla 3 se muestra la escala gráfica aplicada para la detección de anomalías.

En la Tabla 4 se presenta la evaluación que se ha realizado sobre la capacidad de detección de este tipo de anomalías tienen cada uno de los índices de vegetación antes mencionados.

**Tabla 4.** Evaluación de la capacidad de detección de los índices de vegetación analizados

| Índice de Vegetación | Zona de la Sima (seco) | Zona de Pozuelo (húmedos) | Zona del Javalón (húmedos) |
|----------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| PRI1                 | 1                      | 1                         | 2                          |
| PRI2                 | 2                      | 2                         | 3                          |
| NDVI                 | 5                      | 3                         | 5                          |
| PWI                  | 1                      | 1                         | 1                          |
| SR                   | 4                      | 3                         | 5                          |
| MSR                  | 5                      | 3                         | 4                          |
| NPI                  | 1                      | 2                         | 2                          |
| SRPI                 | 2                      | 3                         | 4                          |
| G                    | 2                      | 2                         | 3                          |
| Red Edge             | 1                      | 2                         | 2                          |
| SAVI                 | 3                      | 3                         | 4                          |
| EVI                  | 3                      | 3                         | 4                          |

## 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Atendiendo a los resultados obtenidos, los índices de vegetación que han mostrado un mejor comportamiento para la detección de posibles fugas de CO<sub>2</sub> en análogos naturales han resultado ser el NDVI, SR, MSR, SAVI y EVI.

Los trabajos de investigación en la línea de los índices de vegetación deberán continuar con el análisis del significado de los resultados desde un punto de vista cuantitativo. Se deberán también incorporar aquí los datos procedentes de la campaña hiperspectral aeroportada realizada por el INTA (sensores CASI y AHS) y los datos de medición de los flujos de CO<sub>2</sub> en campo.

También se introducirá la información obtenida en un SIG en el que se incorporarán nuevos condicionantes, tales como geología o tectónica de la zona, que nos ayuden a realizar un análisis multidimensional y profundo, abriendo, quizá, nuevas líneas de investigación.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

ARZARENA, A., VILLA, G. & VALCARCEL, N. 2005. The National Aerial Orthophoto Program in Spain (PNOA). International Cartographic Conference. La Coruña, Spain.

BATESON, L., VELLICO, M., BEAUBIEN, S.E., PEARCE, J.M., ANNUNZIATELLIS, A., CIOTOLI, G., COREN, F., LOMBARDI, S. & MARSH, S. 2008. *The application of remote-sensing techniques to monitor CO<sub>2</sub>-storage sites for surface leakage: method development and testing at Latera (Italy) where naturally produced CO<sub>2</sub> is leaking to the atmosphere.*

CHAVEZ, P. 1988. *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data.* Remote Sensing of Environment 24:459-479.

International Energy Agency GreenHouse Gas R&D Programme (IEAGHG). 2012. *Informe Técnico: Quantification Techniques for CO<sub>2</sub> Leakage.*

Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. 2005. Prepared by Working Group III [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos & L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.

KRAUSE, K. 2005. *Radiometric use of QuickBird imagery.* Digital Globe Inc. Technical Note.

RIAÑO, D., SALAS, J., CHUVIECO, E. 2000. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible.* Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá: 222-239.

ROUSE, J.H., SHAW, J.A., LAWRENCE, R.L., LEWICKI, J.L., DOBECK, L.M., REPASKY, K.S. & SPANGLER, L.H. 2009. *Multi-spectral imaging of vegetation for detecting CO<sub>2</sub> leaking from underground.*

UPDIKE, T. & COMP, C. 2010. *Radiometric use of WorldView-2 imagery.* Digital Globe Inc. Technical Note.

ZARCO-TEJADA, P. J. 1998. *Correlations between CO<sub>2</sub> fluxes and high spatial resolution reflectance imagery.* Master of Science in Remote Sensing. University of Dundee (Scotland, United Kingdom).